

## Rešitve nalog – MERITVE 2. del

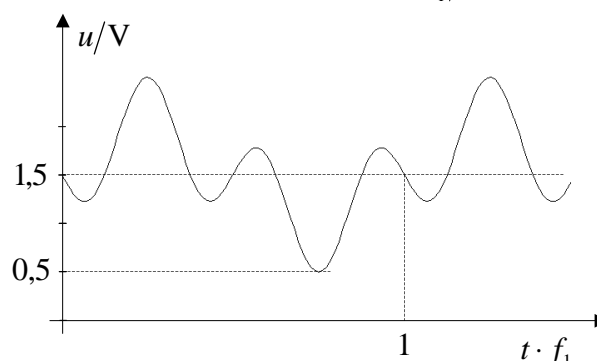
1. Katera je najmanjša vrednost, ki jo dobimo na  $4\frac{3}{4}$ -mestnem prikazovalniku voltmetra, ki ima integrirajoči AD pretvornik s  $T_i = 10\mu s$ , če merimo napetost  $u/V = 1,5 + 0,5\sin(20000t) - 0,5\sin(60000t)$ ? Koliko znaša največji pogrešek zaradi integracije? Napetost merimo na merilnem območju z najboljšo dosegljivo ločljivostjo. Skicirajte razmere!

$$\bar{U} = \hat{u} \frac{\sin \omega T_i / 2}{\omega T_i / 2}$$

### Rešitev:

- Skica signala  $u/V$ , ki doseže minimalno vrednost  $u_{\min} = 0,5V$ , ko se od enosmerne vrednosti  $U_- = 1,5V$  odštejeta amplitudi obeh komponent:

$$\begin{aligned} u_{\min} &= U_- - \hat{u}_1 - \hat{u}_3 \\ &= 1,5V - 0,5V - 0,5V = 0,5V \end{aligned}$$



- Frekvenci osnovne in tretje harmonske komponente določimo iz izrazov:

$$20000/s = 2\pi f_1 \rightarrow f_1 = \frac{10000}{\pi} \text{ Hz};$$

$$60000/s = 2\pi f_2 \rightarrow f_2 = \frac{30000}{\pi} \text{ Hz}$$

- Integrirajoči AD pretvornik zmanjša amplitudo sinusnega signala po funkciji  $\bar{U} = \hat{u} \frac{\sin \pi f T_i}{\pi f T_i}$  v odvisnosti od produkta frekvence sinusnega signala  $f$  in integracijskega časa  $T_i$ :

- Zmanjšana amplituda osnovne komponente:

$$\bar{U}_1 = 0,5V \frac{\sin\left(\pi \frac{10000}{\pi} T_i\right)}{\pi \frac{10000}{\pi} T_i} = 0,5V \frac{\sin(0,1)}{0,1} = 0,499167V$$

- Zmanjšana amplituda tretje harmonske komponente:

$$\bar{U}_2 = 0,5V \frac{\sin(0,3)}{0,3} = 0,492534V$$

- Ker integrirajoči AD pretvornik enosmerne komponente ne popači, dobimo za najmanjšo vrednost:

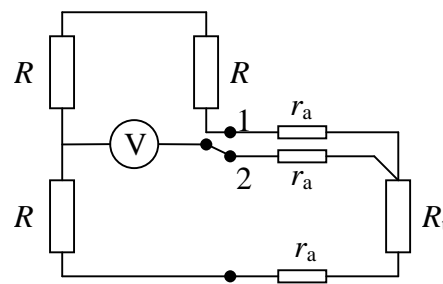
$$U_{\min} = 1,5V - 0,499167V - 0,492534V = 1,5V - 0,9917V = 0,5083V$$

- Napetost je zaokrožena na mestu 0,1mV, ki ga določa  $4\frac{3}{4}$ -mestni prikaz (največ kaže 3,9999)

- Največji pogrešek zaradi integracije znaša:
 
$$e = \frac{U_{\min} - u_{\min}}{u_{\min}} = \frac{U_{\min}}{0,5} - 1 = 0,0166$$

$$\rightarrow e = 0,017\%$$

2. Z uporovnim senzorjem temperature želimo meriti temperaturo s pomočjo Wheatstonovega mostiča. Senzor je preko dolgih vodnikov z upornostjo  $r_a = 10\Omega$  tri-vodno priključen na mostič (stikalo v položaju 2). Pri temperaturi  $20^\circ\text{C}$  je mostič v ravnovesju. Pri kateri temperaturi je mostič ponovno v ravnovesju, če senzor na mostič priklopimo dvo-vodno (stikalo v položaju 1)?



Temperaturna karakteristika senzorja je  $R_t = R_0 \cdot e^{k \cdot t}$ ,  $k = -0,048^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $R_0 = 3265\Omega$ .

### Rešitev:

- Pri **tri-vodni** priključitvi (stikalo v položaju 2) je mostič v ravnovesju, kadar

$$\text{velja: } \frac{R}{R} = \frac{R + r_a}{R_t + r_a} \rightarrow R = R_t$$

- Upornost senzorja je pri  $t = 20^\circ\text{C}$  enaka:

$$R_{20^\circ\text{C}} = R_0 \cdot e^{k \cdot 20^\circ\text{C}} = 1250,15\Omega$$

- Ker je mostič uravnovešen, velja:  $R = R_{20^\circ\text{C}} = 1250,15\Omega$

- Pri **dvo-vodni** priključitvi (stikalo v položaju 1) je mostič v ravnovesju, kadar

$$\text{velja: } \frac{R}{R} = \frac{R}{R_t + 2 \cdot r_a}$$

- in od tod:  $R = R_t + 2 \cdot r_a$  oz.

$$R_t = R - 2 \cdot r_a = 1250,15\Omega - 2 \cdot 10\Omega = 1230,15\Omega$$

- to pa velja pri temperaturi  $t_1$ , ki jo dobimo iz karakteristike uporovnega senzorja:

$$t_1 = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{R_t}{R_0} = -\frac{^\circ\text{C}}{0,048} \cdot \ln \frac{1230,15\Omega}{3265\Omega} = 20,34^\circ\text{C}$$

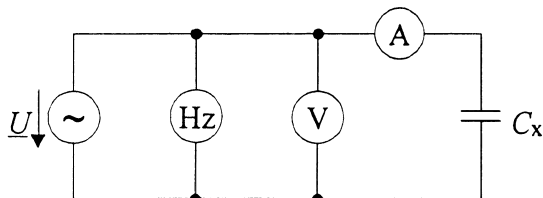
- Razlika v temperaturi  $0,34^\circ\text{C}$  pomeni sistematični pogrešek, če senzor priklopimo dvo-vodno in ne tri-vodno.

3. Skicirajte vezje za merjenje kapacitivnosti  $C_x$  po UI metodi. Koliko največ je lahko faktor izgub  $d = ?$ , da ga zanemarimo pri vrednotenju merilnega rezultata?

- frekvenca:  $f = 1100\text{Hz}$ ,  $u(f) = 1\text{Hz}$ ;
- voltmeter:  $U = 100\text{V}$ ,  $U_D = 120\text{V}$ ,  $r = 0,5$ ;
- ampermeter:  $I = 712\text{mA}$ ,  $M_I = \pm(0,5\% I + 2 \text{ dig})$

**Rešitev:**

- V vezju za merjenje kapacitivnosti  $C_x$  po UI metodi potrebujemo poleg voltmetra in ampermetra tudi merilnik frekvence.



- Pri zaporedni nadomestni vezavi izrazimo kompleksno impedanco in faktor izgub:

$$\frac{U}{I} = Z = \sqrt{R_x^2 + \frac{1}{(\omega C_x)^2}} = \frac{1}{\omega C_x} \sqrt{1 + d^2}, \quad d = \omega C_x R_x$$

- Pri realnem kondenzatorju je kapacitivnost, merjena po UI metodi, nekoliko večja kot pri idealnem brezgubnem kondenzatorju ( $d \rightarrow 0$ ,  $C_x^0$ )

$$C_x = \frac{I}{U 2\pi f} \sqrt{1 + d^2} = C_x^0 \sqrt{1 + d^2}, \quad C_x^0 = \frac{I}{U 2\pi f} = \frac{712\text{mA}}{100\text{V} \cdot 2\pi \cdot 1100\text{Hz}} = 1,030166\mu\text{F}$$

- Ker je povečanje kapacitivnosti sistematičnega značaja, je zanemarljivo, kadar je manjše od desetine merilne negotovosti  $e = \left( \frac{C_x - C_x^0}{C_x^0} \right) \leq \frac{1}{10} w(C_x^0)$ .

- Relativno merilno negotovost zaradi produkta in kvocienta vhodnih veličin zapišemo z geometrijsko vsoto.

$$w(C_x^0) = \sqrt{w^2(I) + w^2(U) + w^2(f)}$$

- Posamezne relativne merilne negotovosti imajo obliko:

$$w(I) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{M_I}{I} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( 0,005 + \frac{2\text{mA}}{712\text{mA}} \right) = 4,508 \cdot 10^{-3}$$

$$w(U) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{M_U}{U} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{r U_D}{100 U} = \frac{1}{\sqrt{3}} 0,005 \frac{120\text{V}}{100\text{V}} = 3,464 \cdot 10^{-3}$$

$$w(f) = \frac{u(f)}{f} = \frac{1\text{Hz}}{1100\text{Hz}} = 9,091 \cdot 10^{-4}$$

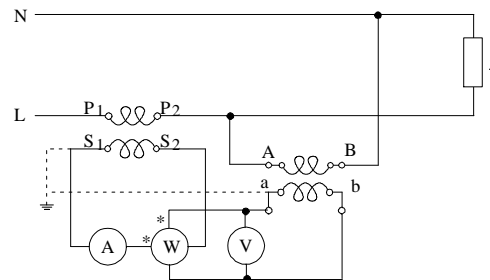
- $w(C_x^0) = \sqrt{(4,508 \cdot 10^{-3})^2 + (3,464 \cdot 10^{-3})^2 + (9,091 \cdot 10^{-4})^2} = 5,7578 \cdot 10^{-3}$

- Vpliv faktorja izgub zanemarimo, kadar je:

$$e \leq \frac{1}{10} w(C_x^0) = 5,7578 \cdot 10^{-4}; \quad 1 + e = \sqrt{1 + d^2} \quad \rightarrow \quad d = \sqrt{(1 + e)^2 - 1} \leq 3,394 \cdot 10^{-2}$$

4. Kolikšne so delovna, jalova in navidezna moč porabnika?

- vatmeter:  $U_n = 100 \text{ V}$ ,  $I_n = 5 \text{ A}$ ,  $y_D = 20000 \text{ d}$ ,  
 $y = 12427 \text{ d}$ ;
- voltmeter:  $U = 105 \text{ V}$ ;
- ampermeter:  $I = 4,82 \text{ A}$ ;
- tokovnik:  $I_{pn} = 75 \text{ A}$ ,  $I_{sn} = 5 \text{ A}$ ;
- napetostnik:  $U_{pn} = 50 \text{ kV}$ ,  $U_{sn} = 100 \text{ V}$ .



### Rešitev:

- Delovna moč se izračuna iz izmerjene vrednosti vatmetra. Potrebno je upoštevati, da je vatmeter priključen na sekundarni strani tokovnega merilnega transformatorja in napetostnega merilnega transformatorja.

$$\begin{aligned}
 P &= K_{un} \cdot K_{in} \cdot P_W = \frac{U_{pn}}{U_{sn}} \cdot \frac{I_{pn}}{I_{sn}} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \frac{y}{y_D} = \\
 &= \frac{50 \text{ kV}}{100 \text{ V}} \cdot \frac{75 \text{ A}}{5 \text{ A}} \cdot 100 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} \cdot \frac{12427 \text{ d}}{20000 \text{ d}} = 2,33 \text{ MW}
 \end{aligned}$$

- pri čemer  $y$  predstavlja odklon vatmetra v delcih,  $y_D$  pa njegov največji odklon.
- Navidezna moč se izračuna iz izmerjenih vrednosti voltmetra in ampermetra. Pozor, tudi ta dva instrumenta sta vezana na sekundarni strani tokovnika in napetostnika.

$$\begin{aligned}
 S &= K_{un} \cdot K_{in} \cdot U \cdot I = \frac{U_{pn}}{U_{sn}} \cdot \frac{I_{pn}}{I_{sn}} \cdot U \cdot I = \\
 &= \frac{50 \text{ kV}}{100 \text{ V}} \cdot \frac{75 \text{ A}}{5 \text{ A}} \cdot 105 \text{ V} \cdot 4,82 \text{ A} = 3,796 \text{ MVA}
 \end{aligned}$$

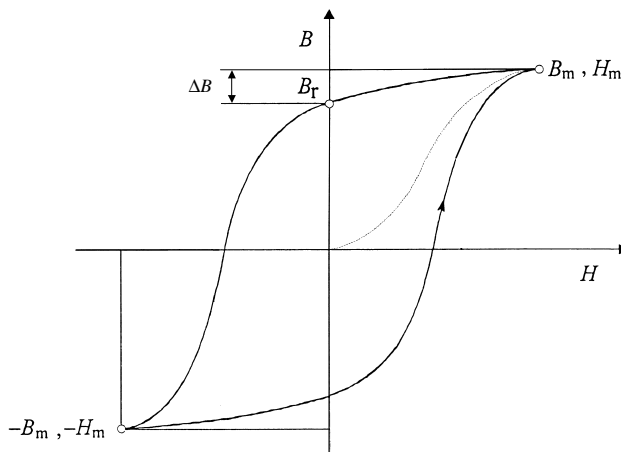
- In še izračun jalove moči.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(3,796 \text{ MVA})^2 - (2,33 \text{ MW})^2} = 2,996 \text{ MVAr}$$

5. Pri komutaciji toka skozi Hopkinsonov jarem smo dobili na zaslonu DSO srednji vrednosti napetosti impulzov:  $-B \rightarrow +B$ :  $\bar{U}_1 = -182 \text{ mV}$ ;  $+B \rightarrow -B$ :  $\bar{U}_2 = 170 \text{ mV}$ . Material je bil v nasičenju pri  $B = 1,7 \text{ T}$ . Koliko znaša remanenčna vrednost magnetne indukcije, če dobimo ob izklopu vzbujanja  $+B \rightarrow B_r$  na osciloskopu  $\bar{U}_{B_r} = 26 \text{ mV}$ . Skicirajte razmere!

**Rešitev:**

- Skica magnetilnice:



- Ob preklopu  $-B \rightarrow +B$  se pri dolčanju srednje vrednosti poleg merjene inducirane napetosti  $u$  integrira tudi enosmerna preostala napetost  $u_0$ :

$$\frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} -u \, dt + \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} u_0 \, dt = \bar{U}_1$$

- Ker se polariteta preostale napetosti ne spremeni, dobimo ob preklopu  $+B \rightarrow -B$ :

$$\frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} u \, dt + \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} u_0 \, dt = \bar{U}_2$$

- S povprečenjem dobimo prispevek same merjene napetosti:

$$\bar{U} = \frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} u \, dt = \left| \frac{\bar{U}_2 - \bar{U}_1}{2} \right| = 176 \text{ mV};$$

- in vrednost preostale napetosti:  $\frac{1}{T_M} \int_0^{T_M} u_0 \, dt = u_0 = \frac{\bar{U}_2 + \bar{U}_1}{2} = -6 \text{ mV}$

- Iz enačbe za magnetno indukcijo  $B = \frac{1}{2 N_2 A} \frac{1}{a} \int_0^{T_M} u \, dt = \frac{T_M \bar{U}}{2 N_2 A a} = \frac{k \bar{U}}{2}$

$$\text{določimo konstanto: } k = \frac{2B}{\bar{U}} = \frac{2 \cdot 1,7 \text{ T}}{176 \text{ mV}} = 19,318 \frac{\text{T}}{\text{V}}$$

- Ob izklopu vzbujanja  $+B \rightarrow B_r$  moramo najprej popraviti napetost za prispevek preostale napetosti:  $\Delta \bar{U}_{B_r} = \bar{U}_{B_r} - u_0 = 26 \text{ mV} - (-6 \text{ mV}) = 32 \text{ mV}$  in izračunati spremembo magnetne indukcije:  $\Delta B = k \Delta \bar{U}_{B_r} = 0,618 \text{ T}$

- Remanenčna vrednost magnetne indukcije znaša:

$$B_r = B_{\max} - \Delta B = 1,7 \text{ T} - 0,618 \text{ T} = 1,082 \text{ T}$$